

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

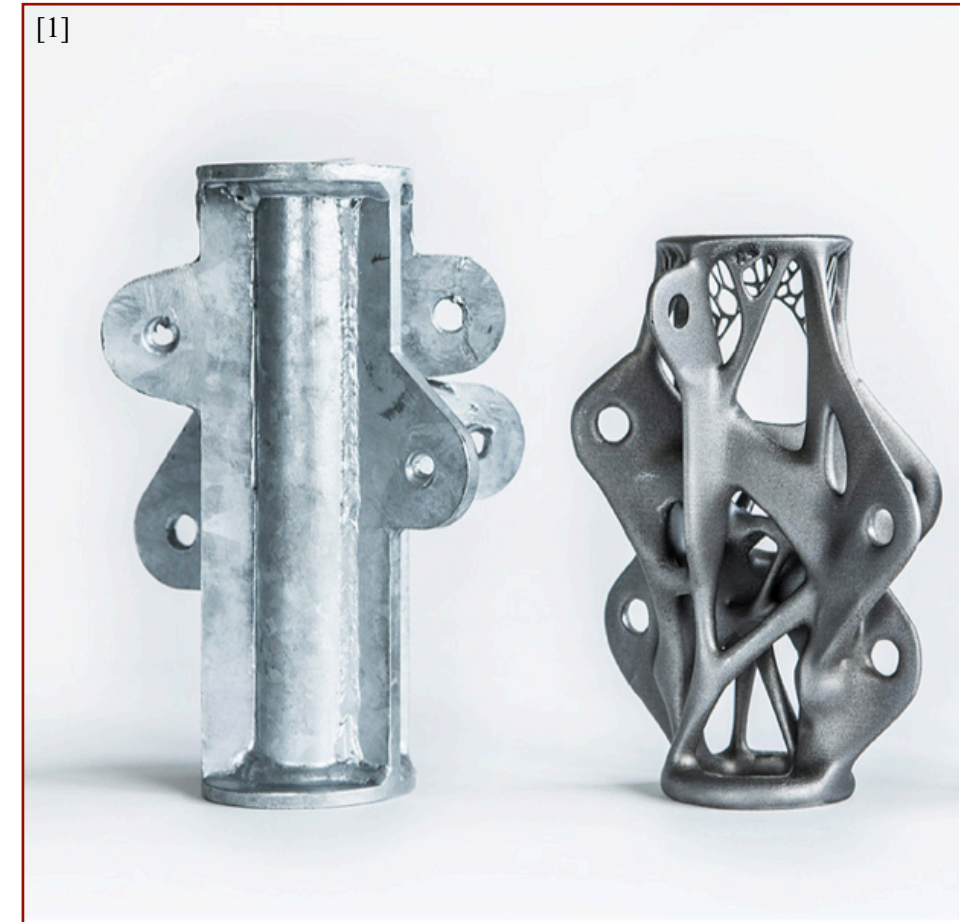
VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA STATICA E A FATICA DI COMPONENTI OTTENUTI DA ADDITIVE MANUFACTURING

Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

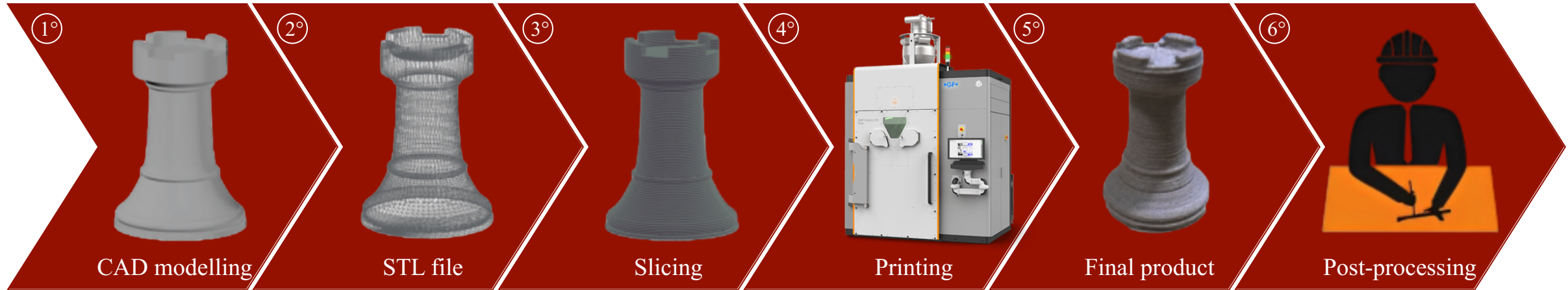
Laureando: Alberto Pegoraro

Padova, 13/03/2023

- Presentazione della tecnologia di *Additive Manufacturing* e rassegna dei *vantaggi* e degli *svantaggi* ad essa associati.
- Introduzione del *fenomeno della fatica* e dei *fattori* che influenzano il comportamento statico e a fatica dei componenti ottenuti tramite AM.
- Confronto della *vita a fatica* di materiali metallici ottenuti mediante *Additive Manufacturing* e mediante *tecniche produttive tradizionali* con particolare attenzione nei confronti delle leghe AlSi10Mg, Ti6Al4V e dell'AISI 316L.
- Analisi del comportamento a fatica di un *componente reale* del mondo automotive: una biella in Ti6Al4V ottenuta tramite SLM



Processo:



Vantaggi:



- Libertà geometrica.
- Unico step produttivo.
- Complexity for free.
- Soluzione ad errori costruttivi.
- Riduzione emissioni CO₂.
- Pesi minori.
- Produzione tailor-made.
- Integrazione canali di raffreddamento.

Svantaggi:



- Volumi di lavoro ridotti.
- Velocità di processo ridotta.
- Impianti complessi e costosi.
- Assenza di ripetibilità.
- Problemi di cyber-sicurezza.
- Necessità di strutture di supporto.
- Finitura superficiale ridotta.
- Gamma di materiali ristretta

**ADDITIVE
MANUFACTURING**

Categoria di processo:

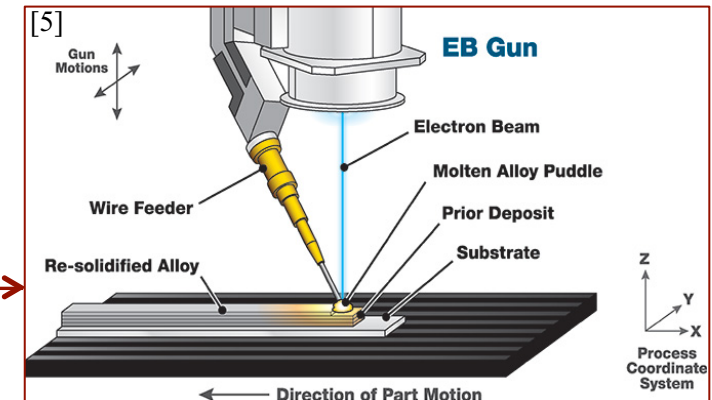
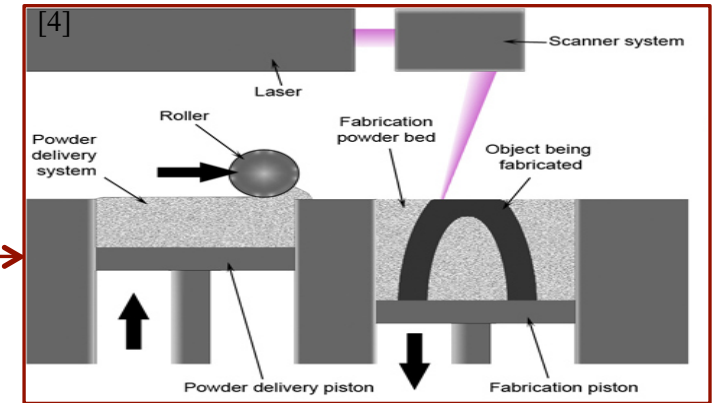
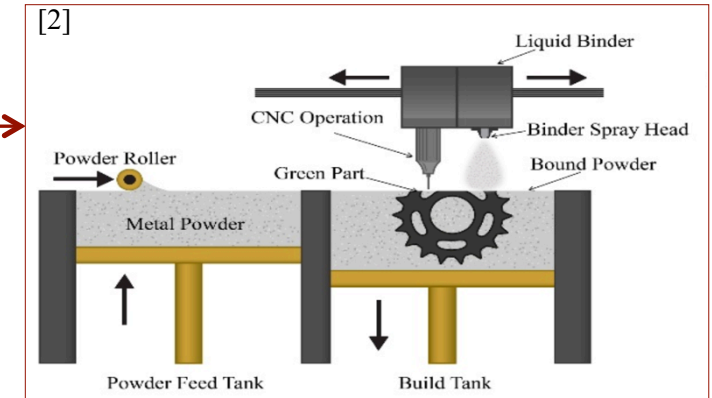
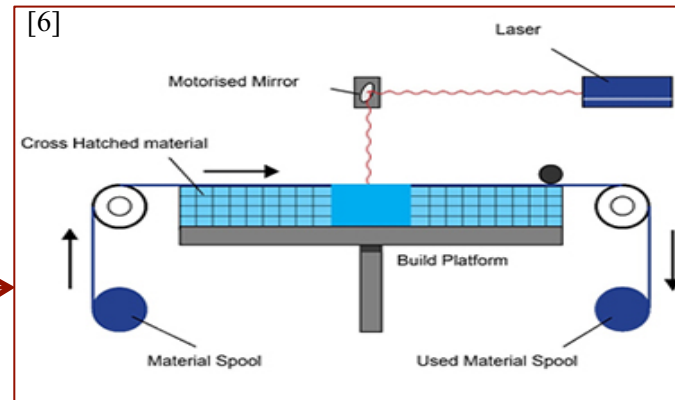
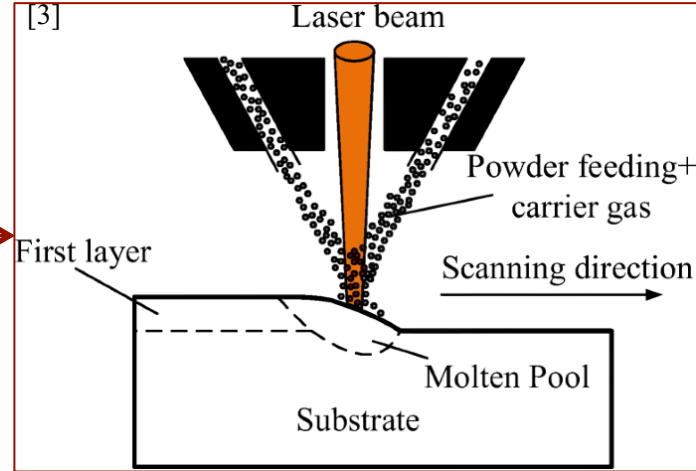
**BINDER
JETTING**

**DIRECT ENERGY
DEPOSITION**

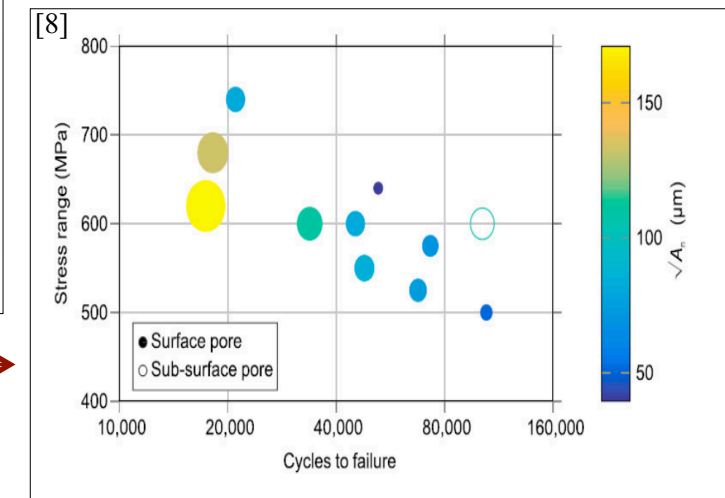
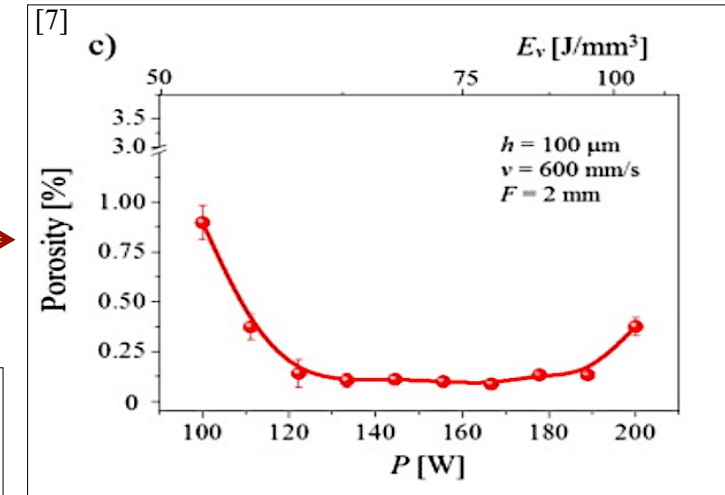
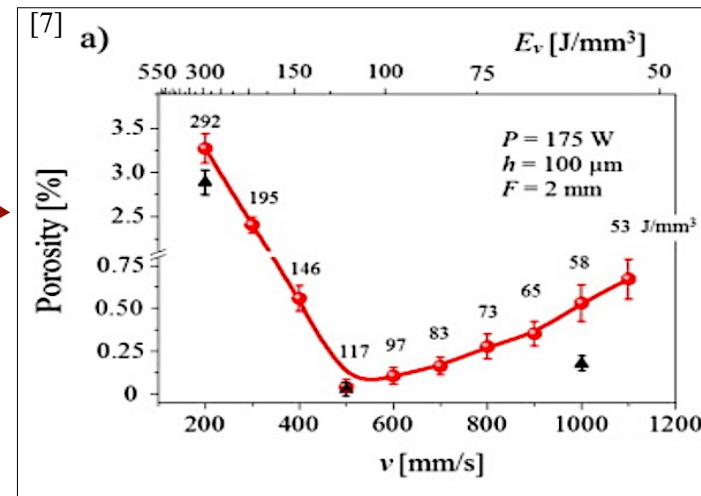
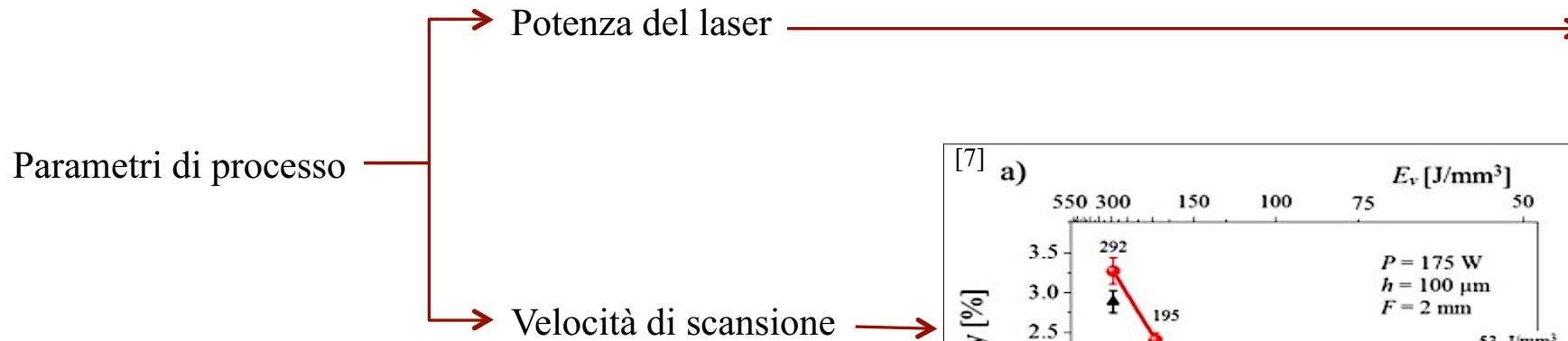
**POWDER BED
FUSION**

**SHEET
LAMINATION**

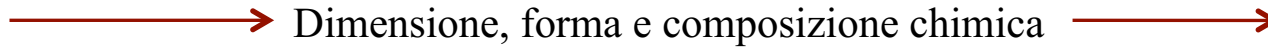
Tecnologia:



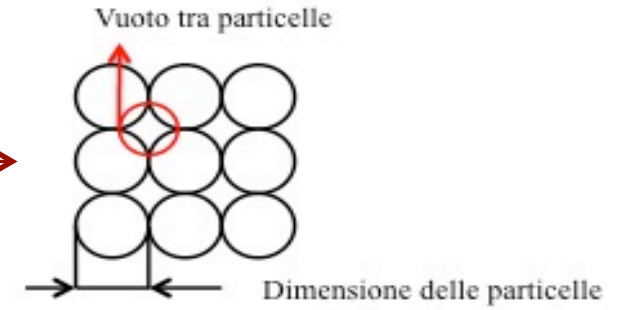
Nucleazione della frattura → Accrescimento della frattura lungo un piano di elevata tensione tangenziale (stadio I), predominante nei materiali duttili → Propagazione della frattura in direzione normale alla tensione di trazione (stadio II), predominante nei materiali fragili → Rottura di schianto



Aspetto delle polveri



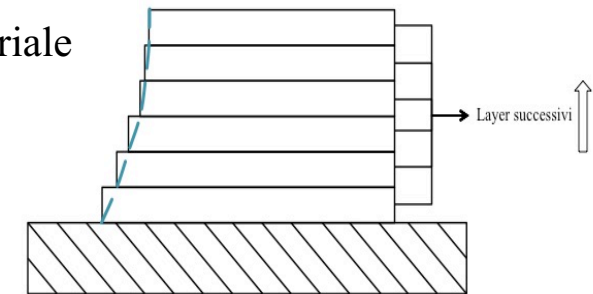
Dimensione, forma e composizione chimica



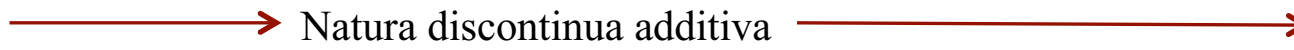
Orientamento dei layer e dei carichi applicati



Comportamento anisotropo del materiale

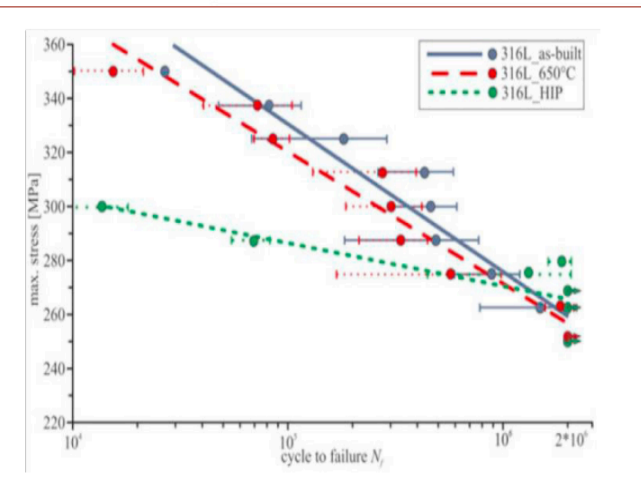
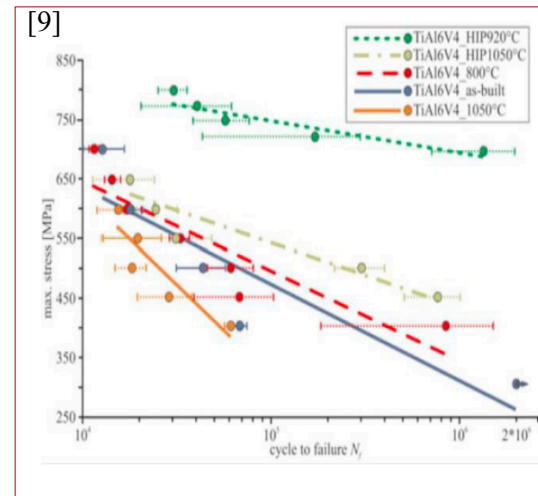


Rugosità superficiale



Natura discontinua additiva

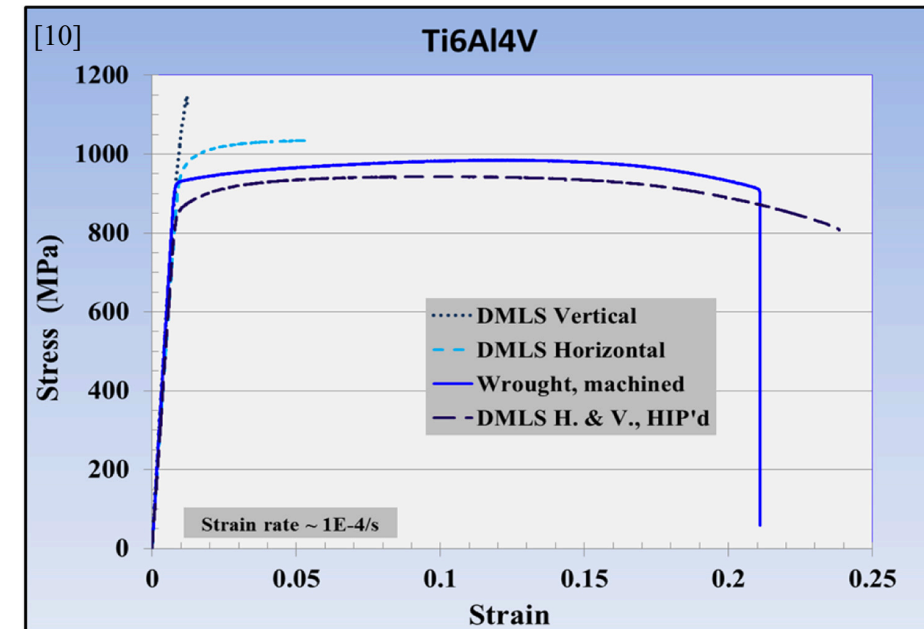
Tensioni residue e trattamenti termici



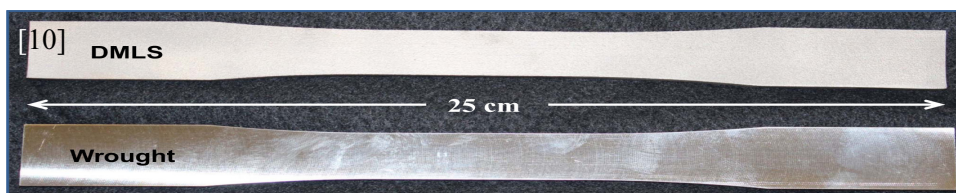
[10]	Fe	Al	V	C	O	N	H	Ti
Ti6Al4V (tested)	0.25	6.5	4.5	0.08	0.13	0.03	0.0125	Balance

Dettagli prova di resistenza statica:

- Polvere EOS GmbH, dimensione da 15 a 45 μm .
- Provini piatti ASTM Standard E8-09 orizzontali e in verticali DMLS.
- Argon e laser con spot di 100 μm .
- Potenza del laser e velocità di scansione proprietà del fornitore di servizi.
- Trattamento distensivo a 650 °C per 2 ore
- Campioni convenzionali da lamiere laminate, lavorati per rugosità superficiale di 1 μm .
- Instron 8501 a temperatura ambiente.
- Controllo di spostamento.



Material	Orientation	Modulus (GPa)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Failure strain
Wrought Ti6Al4V	Longitudinal	113.1	945	979	~0.1
DMLS Ti6Al4V	Horizontal	108.8	972	1034	0.055
DMLS Ti6Al4V	Vertical	114.9	1096	1130	0.012
DMLS Ti6Al4V (HIP)	Hor. & vert.	111.7	862	931	~0.24

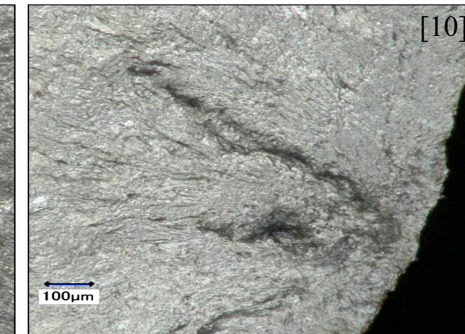
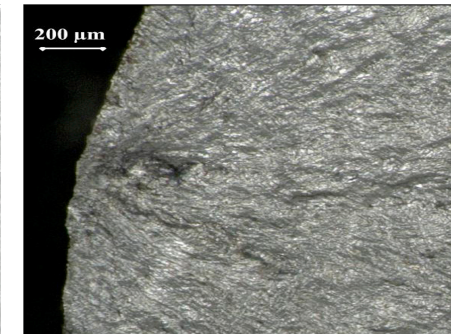
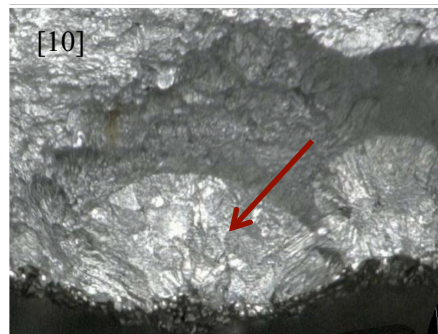
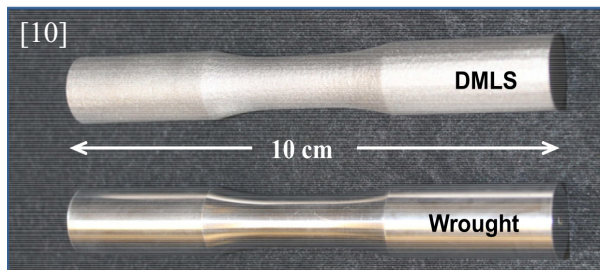
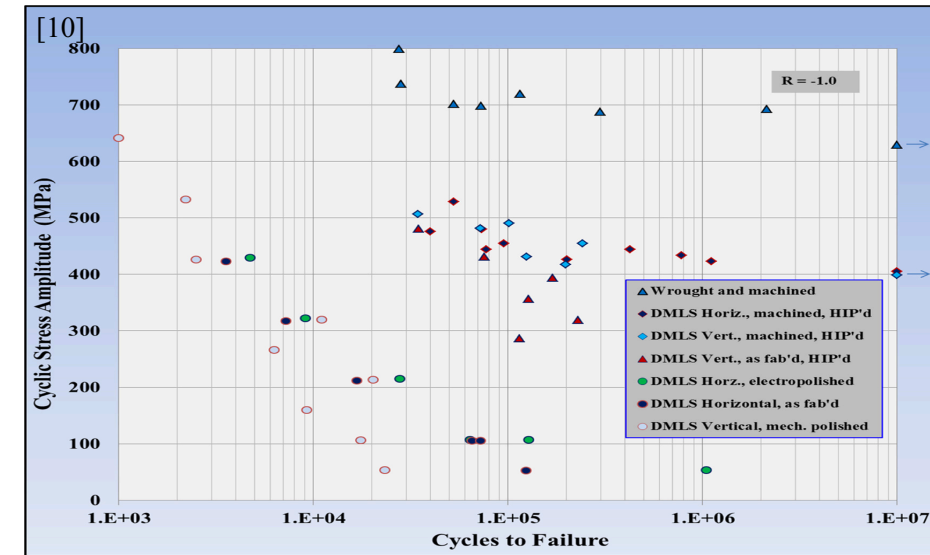


Dettagli prova di fatica:

- Provini cilindrici sia orizzontali che verticali DMLS.
- Alcuni provini post-trattati con lucidatura elettrochimica e altri sottoposti ad HIP.
- Campioni convenzionali da barre laminate e lavorati per rugosità superficiale di 1 μm.
- Modalità a flessione rotante R=-1.
- Systems Integrators RBF850 a temperatura ambiente.
- Frequenze da 20 a 25 Hz.

[10]

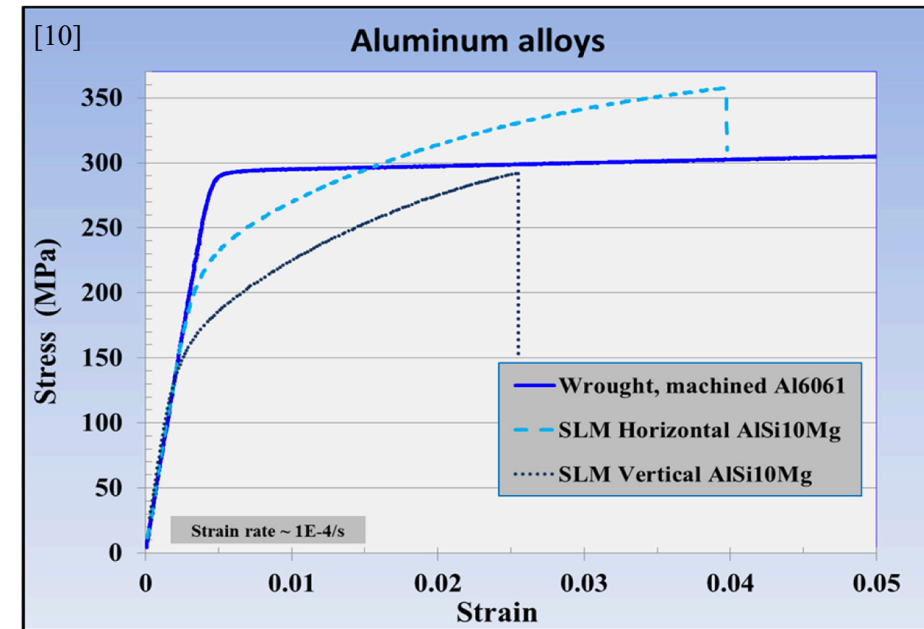
Material	Long.	Horiz. [μm]	Vert. [μm]
WroughtTi6Al4V	Machined and polished	1	1
DMLS Ti6Al4V	As fabricated	11–13	13–16
DMLS Ti6Al4V	Mechanically polished	10	13
DMLS Ti6Al4V	Electropolished	13	16



[10]	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti	Mn	Al
AlSi10Mg (tested)	9.5	0.33	0.15	< 0.001	< 0.002	< 0.003	0.004	< 0.01	Balance

Dettagli prova di resistenza statica:

- Polvere EOS GmbH con dimensione da 20 a 63 μm .
- Provini piatti ASTM Standard E8-09 sia in orizzontali che verticali SLM.
- Argon, laser da 100 W , dimensione spot 100 μm e velocità scansione 930 mm/s.
- Trattamento distensivo a 300 °C per 2 ore.
- Campioni convenzionali in Al6061 da lamiera laminate e lavorati per rugosità superficiale di 1 μm .
- Instron 8501 a temperatura ambiente.
- Controllo di spostamento.



[10]

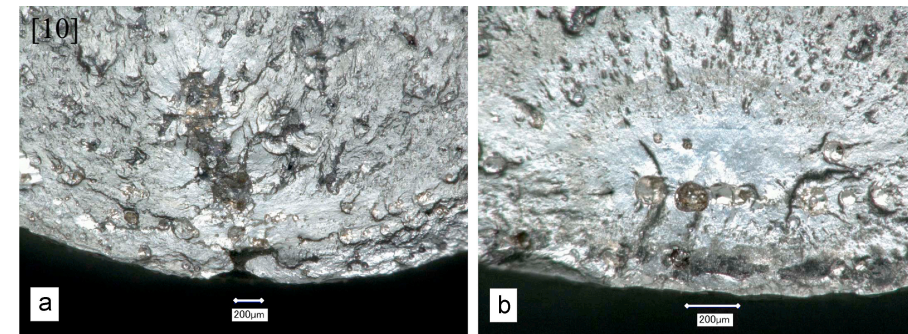
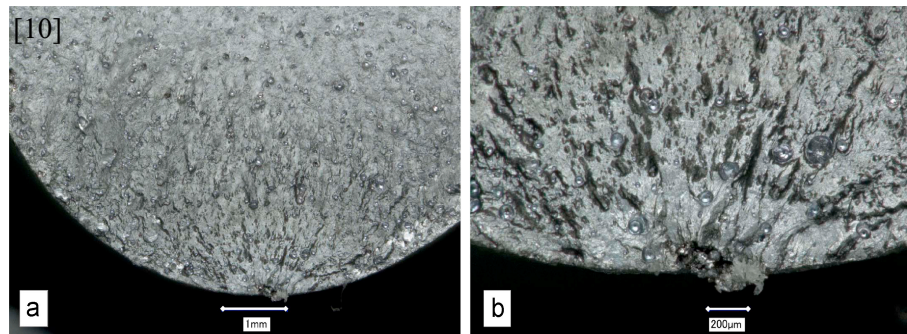
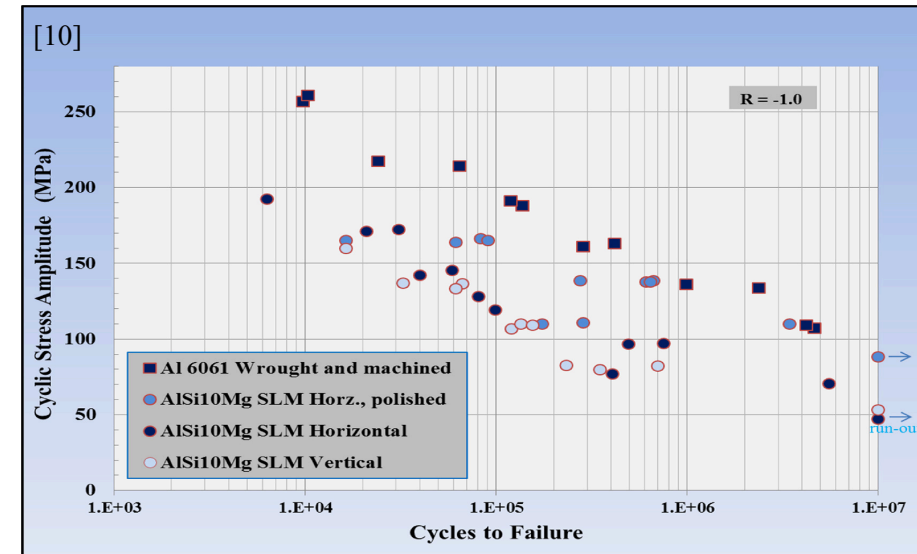
Material	Orientation	Modulus (GPa)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Failure strain
Wrought Al6061	Longitudinal	66.5	293	310	~0.15
SLM AlSi10Mg	Horizontal	65.5	227	358	0.039
SLM AlSi10Mg	Vertical	75.4	172	289	0.026

Dettagli prova di fatica:

- Provini cilindrici sia orizzontali che verticali SLM.
- Alcuni provini post-trattati con lucidatura elettrochimica.
- Campioni convenzionali da barre laminate e lavorati per rugosità superficiale di $1\mu\text{m}$.
- Modalità a flessione rotante $R=-1$.
- Systems Integrators RBF850 a temperatura ambiente.
- Frequenze da 20 a 25 Hz.

[10]

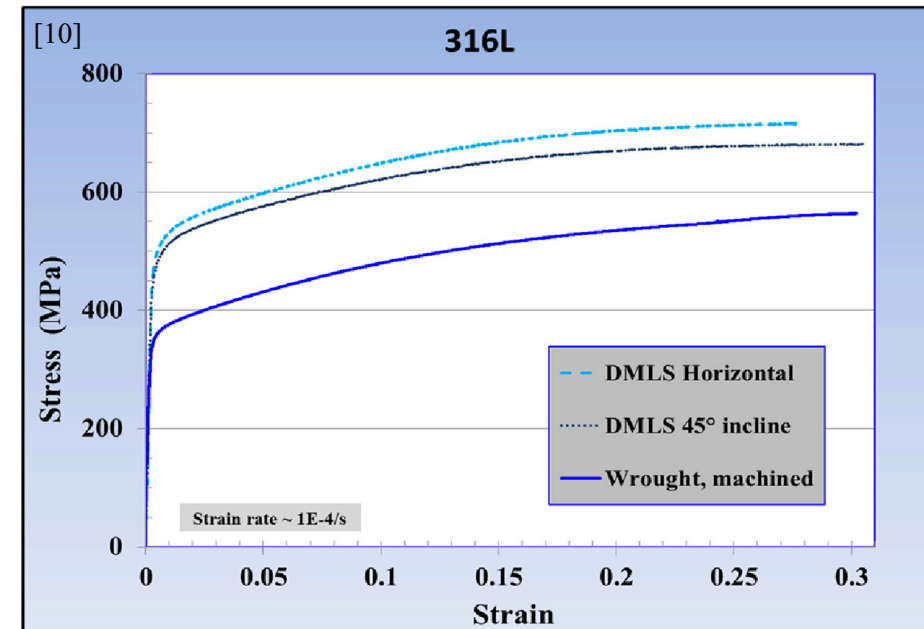
Material	Long.	Horiz. [μm]	Vert. [μm]
Wrought Al6061	Machined and polished	1	1
SLM AlSi10Mg	As fabricated	4-5	5-6
SLM AlSi10Mg	Mechanically polished	1.5	2
SLM AlSi10Mg	Electropolished	4.7	5.8



[10]	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	O	N	Fe
SS316L (tested)	16.9	10.9	2.4	1.3	0.5	0.02	0.003	0.04	0.18	Balance

Dettagli prova di resistenza statica:

- Polvere EOS GmbH con dimensione da 15 a 45 μm .
- Provini piatti ASTM Standard E8-09 orizzontali ed inclinati SLM.
- Azoto gassoso, laser da 195 W, dimensione spot di 100 μm e velocità scansione 750 mm/s.
- Trattamento distensivo a 388 °C per 4 ore.
- Campioni convenzionali da lamiere laminate e lavorati per rugosità superficiale di 1 μm .
- Instron 8501 a temperatura ambiente.
- Controllo di spostamento.



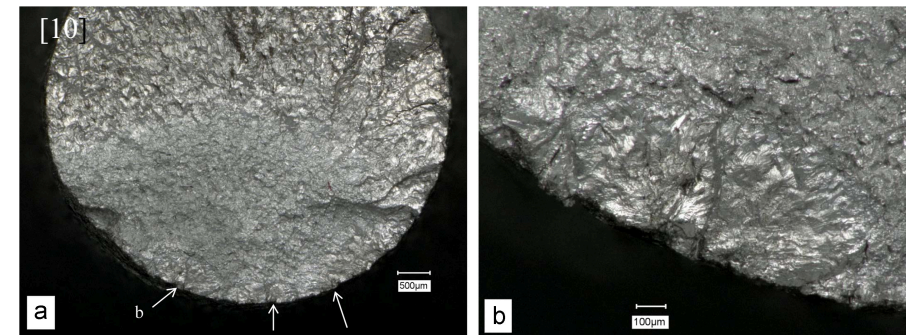
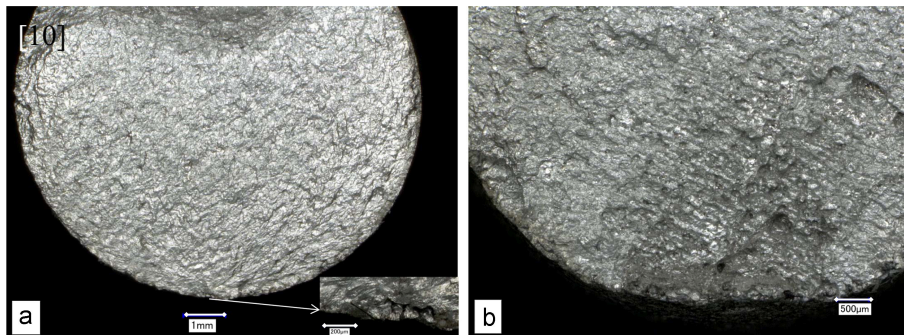
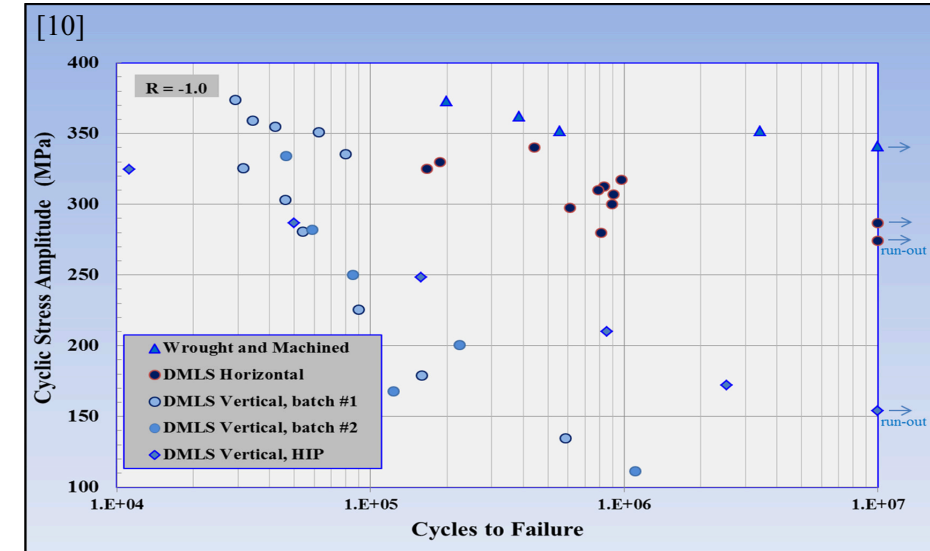
Material	Orientation	Modulus (GPa)	Yield (MPa)	Ultimate (MPa)	Failure strain
Wrought 316L	Longitudinal	187	345	563	~0.30
DMLS 316L	Horizontal	180	496	717	0.28
DMLS 316L	45° Incline	193	473	680	~0.30

Dettagli prova di fatica:

- Provini cilindrici sia orizzontali che verticali DSLM.
- Campioni convenzionali da barre laminate e lavorati per rugosità superficiale di $1\mu\text{m}$.
- Alcuni provini post-trattati con HIP.
- Modalità a flessione rotante $R=-1$.
- Systems Integrators RBF850 a temperatura ambiente.
- Frequenze da 20 a 25 Hz.

[10]

Material	Long.	Horiz. [μm]	Vert. [μm]
Wrought 316L	Machined and polished	1	1
DMLS 316L	As fabricated	5-6	6-8



Ti6Al4V DMLS:

- Cedimenti di tipo fragile a bassi tassi di deformazione, UTS sensibilmente superiore.
- Trattamento termico HIP ha aumentato la duttilità del materiale.
- Vita a fatica “as-fabricated” con valori molto bassi.
- Trattamento HIP, ha aumentato la vita a fatica fino al 70% di quella del materiale convenzionale.

AlSi10Mg SLM:

- Snervamento graduale ed indurimento con rottura fragile a bassi tassi di deformazione.
- Tensione di snervamento dei campioni verticali notevolmente inferiore rispetto a Al6061.
- Resistenza a fatica 60% di Al6061 sia per orizzontali sia verticali.
- Trattamenti superficiali poco influenti.

316L DMLS:

- migliori rispetto a quelli tradizionali per resistenza statica.
- Vita a fatica provini orizzontali quasi comparabile a materiale tradizionale.
- Lavorazione della superficie e HIP entrambi efficaci.

[10]	Ti6Al4V tradizionale	AM Ti6Al4V verticale HIP	AM Ti6Al4V orizzontale HIP	AM Ti6Al4V orizzontale elettrolucidato	Al6061	AM AlSi10Mg verticale	AM AlSi10Mg orizzontale	AM AlSi10Mg orizzontale lucidato	316L tradizionale	AM 316L orizzontale	AM 316L verticale	AM 316L verticale HIP
Resistenza a fatica a basso numero di cicli (σ_a)	>800 MPa	>500 MPa	320 MPa	>500 MPa	260 MPa	160 MPa	180 MPa	180 MPa	>400 MPa	>350 MPa	350 MPa	320 MPa
Resistenza a fatica ad alto numero di cicli (σ_a)	630 MPa	400 MPa	400 MPa	/	100 MPa	50 MPa	50 MPa	90 MPa	340 MPa	280 MPa	<100 MPa	150 MPa

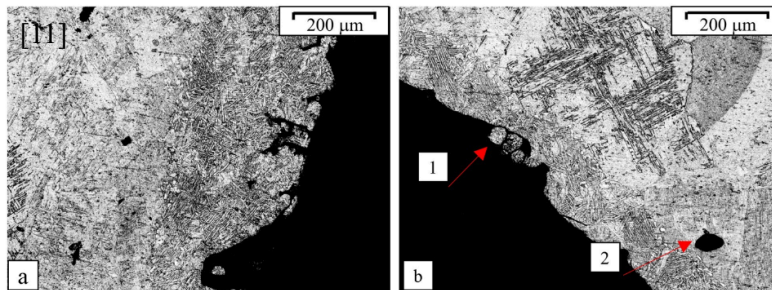
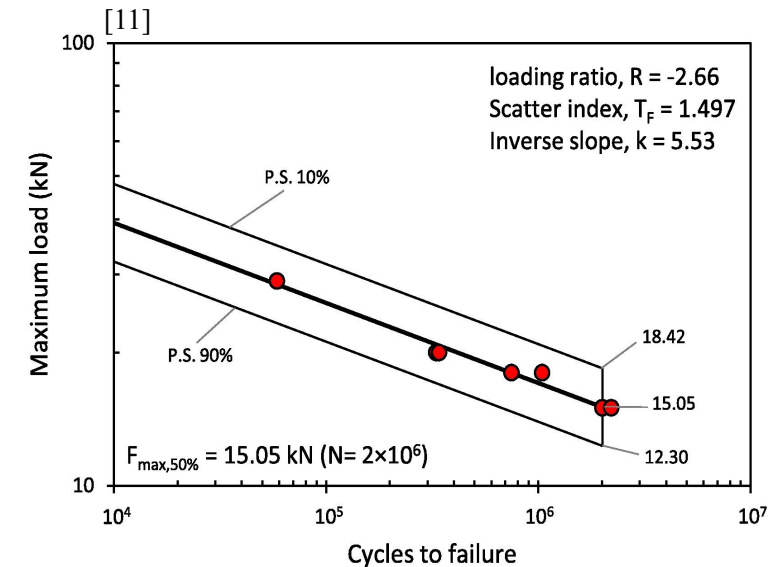
Dettagli dell'esperimento:

- Biella in Ti6Al4V SLM.
- Condizioni di carico effettivo servizio operativo.
- Solubilizzazione super- β transus a 1015°C per 0,5 ore, rinvenimento a 730°C per 2 ore e pallinatura.
- Polvere di EOS GmbH.
- Canali di raffreddamento integrati.
- Macchina DMLS "EOSINT M290".
- Rapporto di carico di $R = -2,66$ e la frequenza di carico di 10 Hz.



[11]

No	Maximum load (kN)	Minimum load (kN)	Loading ratio	Cycles to failure	Note
1	29	-77	-2.66	58,488	
2	20	-53.1	-2.66	329,038	
3	20	-53.1	-2.66	339,815	
4	18	-47.8	-2.66	745,235	
5	18	-47.8	-2.66	1,039,429	
6	15	-39.8	-2.66	2,000,000	Run-out
7	15	-39.8	-2.66	2,000,000	Run-out



- [1] <https://www.ennomotive.com/beyond-rapid-prototyping-with-3d-printing/>
- [2] <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/>
- [3] Zhang, H., Zhu, L. & Xue, P. “Laser direct metal deposition of variable width thin-walled structures in Inconel 718 alloy by coaxial powder feeding.” *Int J Adv Manuf Technol* 108, 821–840 (2020).
- [4] https://it.wikipedia.org/wiki/Fusione_laser_selettiva_di_metalli
- [5] <https://3dprintingindustry.com/news/new-facility-selective-electron-beam-melting-84074/>
- [6] <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>
- [7] G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, and G. Requena, "Correlation between porosity and processing parameters in Ti-6Al-4V produced by selective laser melting," *Materials and Design*, vol. 105, 2016, pp. 160-170.
- [8] S. Tammam-Williams, P. Withers, I. Todd, and P. Prangnell, "The influence of porosity on fatigue crack initiation in additively manufactured titanium components," *Scientific Reports*, vol. 7, 2017.
- [9] S. Leuders, T. Lieneske, S. Lammers, T. Tröster, and T. Niendorf, "On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting –The role of ductility," *Journal of Materials Research*, vol. 29, 2014, pp. 1911-1919.
- [10] Mower TM, Long MJ, “Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials”. *Mater Sci Eng A* 2016;651:198–213.
- [11] Cecchel S, Mohammad Javad Razavi S, Mega F, Cornacchia G, Avanzini A, Battini D, et al. “Fatigue testing and end of life investigation of a topology optimized connecting rod fabricated via Selective Laser Melting”, *International Journal of Fatigue*, Volume 164, 2022, 107134, ISSN 0142-1123.